

XÂY DỰNG CÔNG CỤ KIỂM KÊ PHÁT THẢI CẢNG BIỂN (SPEI) ỨNG DỤNG MÔ HÌNH HIỆN ĐẠI - NGHIÊN CỨU THÍ ĐIỂM CHO TÀU BIỂN TẠI CẢNG HẢI AN

DEVELOPMENT OF THE SHIP PORT EMISSION INVENTORY (SPEI) TOOL USING ADVANCED MODELS: A PILOT STUDY FOR MARINE VESSELS AT HAI AN PORT

ĐOÀN LÊ NAM KHÁNH¹, PHAN VĂN HƯNG^{2*}, LÊ CÔNG DOANH¹

¹Sinh viên Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phanvanhung@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1083>

Tóm tắt

Nghiên cứu đề xuất công cụ kiểm kê phát thải cảng biển SPEI, được coi là cơ sở cần thiết trong mọi chiến lược giảm thiểu phát thải. Công cụ ứng dụng mô hình học máy XGBoost và LightGBM giúp dự đoán lượng phát thải đạt độ chính xác cao hơn R² lớn hơn 0,96 với MAPE nhỏ hơn 7% khi ứng dụng thí điểm trong kiểm kê lượng phát thải của tàu biển ra vào trong phạm vi cảng Hải An tính từ ngày 01/02/2025 đến ngày 08/02/2026 với lượng khí nhà kính CO₂e đạt 13437,757 tấn và NO_x đạt 176,247 tấn và PM₁₀ đạt 3,4356 tấn. Đây là cơ sở khoa học quan trọng giúp cảng Hải An đánh giá và xây dựng kế hoạch giảm thiểu lượng phát thải của tàu biển khi hoạt động trong khu vực cảng, đặc biệt là trong giai đoạn làm hàng. Công cụ kiểm kê phát thải cảng biển SPEI giúp cho việc đưa ra biện pháp từ vi mô tới vĩ mô tại các khu vực cảng biển, đề xuất xây dựng hệ thống quản lý phát thải cảng biển tại Việt Nam, hướng tới mục tiêu Net Zero và phát triển kinh tế biển bền vững tầm nhìn năm 2050.

Từ khóa: Mô hình học máy, tàu biển, quản lý phát thải, SPEI.

Abstract

The research proposes the SPEI port emission inventory tool, regarded as a necessary prerequisite for all emission mitigation strategies. The tool integrates machine learning models, namely XGBoost and LightGBM, to predict emission levels with high accuracy, achieving an R² greater than 0,96 and a MAPE lower than 7%. A pilot application was conducted to estimate emissions from ships operating within Hai An

Port during the period from February 1, 2025 to February 8, 2026. The results indicate that total emissions reached 13437,757 tons of CO₂e, 176,247 tons of NO_x, and 3,4356 tons of PM₁₀. These findings provide a significant scientific basis for Hai An Port to assess and develop emission reduction strategies for ship activities within the port area, particularly during cargo handling operations. The SPEI tool enables the formulation of mitigation measures at both micro and macro levels across port areas, contributing to the development of an integrated port emission management system in Vietnam, and supporting the transition toward Net Zero emissions and sustainable marine economic development with a vision toward 2050.

Keywords: Machine learning, ship emissions, port emission management, SPEI.

1. Mở đầu

Vận tải biển là xương sống của thương mại toàn cầu, đảm nhận đến 80% khối lượng hàng hóa giao thương quốc tế [1]. Dù được coi là phương thức vận tải có hiệu quả kinh tế cao, sự phát triển bùng nổ của ngành hàng hải lại mang đến những tác động tiêu cực to lớn đối với môi trường. Ước tính, ngành vận tải biển đóng góp khoảng 3% tổng lượng phát thải khí nhà kính (GHG) toàn cầu và ghi nhận mức tăng 20% trong thập kỷ qua [2], đồng thời các nghiên cứu dự báo lượng khí thải này có thể tăng từ 90% đến 130% vào năm 2050 so với mức của năm 2008 nếu không có các biện pháp can thiệp quyết liệt [3]. Khí thải từ tàu biển bao gồm các chất CO₂, CO, HC, CH₄, N₂O, NO_x, SO_x, PM₁₀ và PM_{2.5} không chỉ làm trầm trọng thêm tình trạng biến đổi khí hậu mà còn đe dọa nghiêm trọng đến chất lượng không khí tại các khu vực ven biển và

sức khỏe cộng đồng [4, 5].

Tại Việt Nam, hệ thống cảng biển đóng vai trò trọng điểm trong phát triển kinh tế quốc gia. Trong những năm gần đây, lưu lượng tàu thuyền và sản lượng hàng hóa thông qua các cụm cảng (đặc biệt là cảng container) không ngừng gia tăng. Theo quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng biển Việt Nam, sản lượng hàng hóa dự kiến sẽ tiếp tục tăng mạnh trong giai đoạn tới năm 2030 và tầm nhìn 2050 [6]. Sự gia tăng hoạt động logistics đặt ra áp lực to lớn về việc kiểm soát ô nhiễm, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam cam kết tại COP26 về việc đạt mức phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050.

Nhằm thực hiện mục tiêu đó, nhóm tác giả nghiên cứu xây dựng một công cụ kiểm kê lượng phát thải cảng biển ứng dụng thuật toán học máy hiện đại. Để đánh giá tính khả thi và độ tin cậy của mô hình áp dụng cho công cụ, nghiên cứu đã tiến hành ứng dụng thí điểm nền tảng này trong việc định lượng xả thải thực tế cho tàu ra vào tại cảng Hải An.

2. Tổng quan tài liệu

Để đánh giá và quản lý phát thải từ tàu biển, các tổ chức quốc tế như IPCC và EMEP/EEA đã phân loại các phương pháp kiểm kê thành ba cấp độ gồm Tier 1, Tier 2 và Tier 3 [7], dựa trên hai cách tiếp cận chính là phương pháp tiếp cận từ trên xuống và tiếp cận từ dưới lên. Trong đó, phương pháp tiếp cận từ trên xuống cho phép ước tính phát thải khoảng cách di chuyển trung bình của tàu và (hoặc) thời gian trung bình di chuyển) và thời gian trung bình tại cảng [8, 9] hoặc dựa trên việc điều tra chi tiết về tiêu thụ nhiên liệu của tàu [10, 11]. Phương pháp này áp dụng rộng rãi tại các nước đang phát triển nhưng độ chính xác còn hạn chế do chưa phản ánh được điều kiện vận hành thực tế của từng tàu [12, 13]. Phương pháp tiếp cận từ dưới lên cho độ chính xác cao hơn do tính đến chi tiết các thông số kỹ thuật và dữ liệu hoạt động của từng tàu [14, 15], do đó phương pháp được ưa chuộng nhiều hơn khi muốn tính với độ chính xác cao cho một khu vực cảng biển hay một phạm vi nhất định [12].

Bảng 1. Tổng quan một số nghiên cứu về kiểm kê khí thải tại Việt Nam

Nguồn	Tên nghiên cứu	Tác giả	Năm	Phạm vi	Phương pháp
[16]	The MATLAB Toolbox for GPS Data to Calculate Motorcycle Emission in Hanoi - Vietnam	Lê Anh Sơn và cộng sự	2012	Tính toán cho xe máy tại Hà Nội	Kết hợp Tier 2 và 3
[17]	Tính toán phát thải các chất ô nhiễm không khí và mô hình hóa chất lượng không khí cảng Sài Gòn, Việt Nam	Hồ Quốc Bằng và cộng sự	2013	Cảng Tân Thuận và Tân Thuận 2	Tiếp cận từ trên xuống Tier 1
[18]	Tính toán phát thải khí thải và ứng dụng hệ mô hình TAPM - ERMOD mô phỏng ô nhiễm không khí từ hệ thống bến cảng HCM	Võ Hoàng Ngọc Khuê và cộng sự	2018	24 cảng biển tại TP. Hồ Chí Minh	Tiếp cận từ trên xuống Tier 1
[19]	Sử dụng dữ liệu nhận dạng tự động AIS ước tính lượng phát thải của tàu thuyền hoạt động tại thành phố Hồ Chí Minh	Đỗ Phong Lưu	2020	Phát thải tàu biển tại thành phố HCM	Tiếp cận từ dưới lên Tier 2
[20]	Nghiên cứu thuật toán xác định lượng khí thải CO ₂ và năng lượng tiêu hao dựa trên mô hình xây dựng cảng container	Huỳnh Tất Minh, Phan Minh Tiến	2022	Phát thải cảng Tân Vũ và Nam Đình Vũ	Tiếp cận từ trên xuống Tier 1
[21]	Phát thải từ hoạt động của xe mô tô, xe gắn máy trong giao thông đường bộ tại thành phố Hà Nội	Trần Thị Hồng Hiền và cộng sự	2022	Phát thải của xe trong 1 năm	Kết hợp Tier 2 và 3
[22]	Nghiên cứu hiệu quả hoạt động luân chuyển hàng hóa và lượng khí thải của tàu tàu biển ở cảng MPC Hải Phòng	Ngô Như Tại và cộng sự	2025	Cảng MIPEC năm 11/2024	Tiếp cận từ dưới lên Tier 3
[23]	Đánh giá phát thải trong giai đoạn vận hành khi thay thế phà Cát Lái bằng cầu vượt sông	Phạm Thanh Tuấn và cộng sự	2025	Phát thải xe cộ - Bến phà Cát Lái	Tiếp cận từ trên xuống Tier 1

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về kiểm kê phát thải trong lĩnh vực giao thông và hàng hải cũng đã được thực hiện trong những năm gần đây. Nhằm đánh giá

tổng quan về việc kiểm kê lượng phát thải tại Việt Nam, nhóm tác giả đã thực hiện tổng hợp, một số nghiên cứu tiêu biểu tại Việt Nam từ năm 2012 đến năm 2025 tại Bảng 1: Nhìn chung tại Việt Nam, công tác kiểm kê khí thải giao thông đang ngày càng được chú trọng. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu chuyên sâu, áp dụng phương pháp kiểm kê bậc cao như Tier 3 với hệ số phát thải đặc thù theo điều kiện thực tế lại chủ yếu tập trung vào lĩnh vực giao thông đường bộ, điển hình như các đánh giá phát thải cho xe mô tô tại các đô thị lớn [16, 21].

Trong khi đó, đối với lĩnh vực hàng hải/tàu biển. Phần lớn các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam vẫn chủ yếu áp dụng phương pháp truyền thống dựa trên hệ số phát thải trung bình và cách tiếp cận từ trên xuống (top-down), tương ứng với các cấp độ Tier 1 và Tier 2. Cách tiếp cận này có ưu điểm là đơn giản và dễ áp dụng trong điều kiện hạn chế về dữ liệu, nhưng vẫn tồn tại nhiều hạn chế đáng kể, kéo theo việc chưa đánh giá đúng lượng phát thải cục bộ và có thể dẫn tới những chính sách chưa đúng trọng tâm. Nhằm nâng cao độ chính xác trong kiểm kê lượng phát thải cho tàu biển tại Việt Nam, nghiên cứu xem xét ứng dụng các mô hình học máy hiện đại vào kiểm kê phát thải tàu biển.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới cho thấy việc áp dụng AI đạt được hiệu quả cao trong quá trình kiểm kê phát thải. Trong nghiên cứu của Hala Salem Al

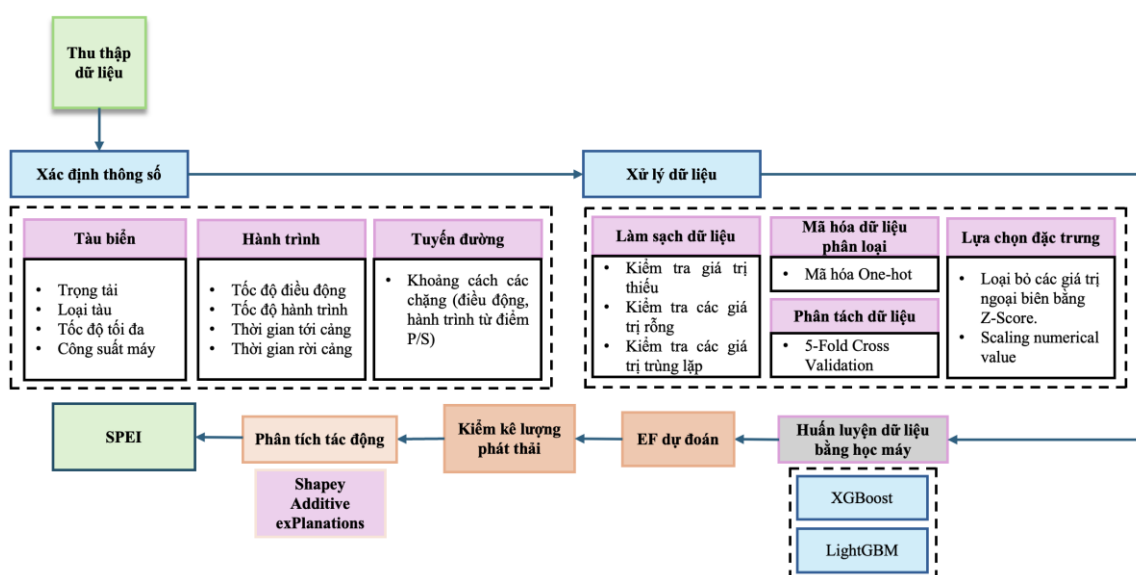
Nuaimi và cộng sự, 2025 [24] đã tổng hợp hơn 20 mô hình học máy Machine Learning và Deep Learning hiện đại trong đánh giá mức độ phát thải tàu biển, phân tích các đặc điểm và tính phù hợp của từng mô hình trên các bộ dữ liệu khác nhau. Nghiên cứu của Guangnian Xiao và cộng sự, 2024 [25] đã phân tích dựa trên 476 bài nghiên cứu từ năm 2002 đến năm 2022 và khẳng định ứng dụng trí tuệ nhân tạo AI trong các lĩnh vực vận tải biển là một xu hướng sẽ bùng nổ trong tương lai. Nghiên cứu của Farzadmehr và cộng sự, 2025 [26] đã phân loại và đánh giá chi phí - lợi ích của 30 sáng kiến AI đang được triển khai thực tế bởi các tổ chức tại cảng biển.

So với xu hướng này, có thể thấy rằng tại Việt Nam vẫn còn thiếu các nghiên cứu về AI trong lĩnh vực đánh giá khí thải hàng hải, phát triển các công cụ quản lý phát thải tàu biển ứng dụng trí tuệ nhân tạo hoặc các thuật toán phân tích dữ liệu hiện đại. Đặc biệt, chưa có nhiều công trình tập trung xây dựng các hệ thống hỗ trợ quản lý phát thải ở cấp độ từng tàu tại các cảng biển cụ thể [27].

Từ góc độ đó, trong bài nghiên cứu này, nhóm tác giả lựa chọn mô hình học máy phù hợp để ứng dụng tại cảng biển Việt Nam, tạo tiền đề ứng dụng Machine Learning và Deep Learning trong các nghiên cứu sau mang lại giải pháp hữu ích trong phát triển bền vững của cảng biển tại Việt Nam.

3. Phương pháp nghiên cứu

Quy trình vận hành của công cụ SPEI được thiết lập dựa trên một chuỗi xử lý dữ liệu khép kín, tính tiền từ bước định lượng vi mô đến hoạch định chiến lược (Hình 1). Ở pha khởi tạo, dữ liệu đầu vào được hệ



Hình 1. Quy trình kiểm kê khí thải thông qua SPEI

Bảng 2. Thông số kỹ thuật tàu biển cập cảng Hải An

Tên tàu	Tốc độ tối đa (knots)	Trọng tải (GT)	Năm đóng	Loại máy chính	RPM	Công suất máy chính (kW)	Công suất máy phụ (kW)	Lượt cập cảng
HAIAN TIME	21,1	13267	2001	1DE : 2 SA 8 CY	100	11440	2516,8	44
HAIAN ALFA	18,5	18852	2023	Man B & W 6S60ME-C10.5, Tier II	93	13200	2904	41
HAIAN BETA	19,1	18852	2024	Man B & W 6S60ME-C10.5, Tier II	93	13200	2904	39
HAIAN LINK	18	12559	2010	(1) 2T - 7 CYL - 500 MM X 1910 MM AT 127 RPM	127	9988	2197,36	38
HAIAN PARK	17,3	9413	2000	1DE : 2 SA 6 CY	104	7980	1755,6	32
HAIAN BELL	19	14308	2003	7 S 50 MC-C MAN B & W	127	11060	2433,2	35
HAIAN ROSE	21,6	17515	2008	1DE : 2 SA 7 CY	125	15820	3480,4	20
HAIAN IRIS	20,1	9963	2011	1DE : 2 SA 6 CY	101	9480	2085,6	7
HAIAN EAST	20	18102	2008	7UEC60LSE	104	15785	3472,7	9
HAIAN DELL	21,6	17280	2008	1DE : 2 SA 7 CY	127	15820	3480,4	14
HAIAN VIEW	21,5	17280	2009	1DE : 2 SA 7 CY	127	15820	3480,4	9
PEGASUS DREAM	19,6	9924	2024	MAN B&W 6 S46ME-B8.3	134	6.290	1383,8	26
SM TOKYO	21,1	9928	2007	MAN-B&W 7L58/64	400	9730	2140,6	22

thống thu thập và phân rã thành ba véc-tơ thông số cốt lõi: (1) Đặc tính kỹ thuật của tàu biển; (2) Tham số hành trình; và (3) Dữ liệu không gian tuyến đường. Tập dữ liệu đa chiều này được xử lý và huấn luyện bởi các thuật toán học máy tăng cường tiên tiến, bao gồm XGBoost và LightGBM, nhằm thực thi nhiệm vụ kiểm kê lượng khí xả thải với độ chính xác cao.

3.1. Thu thập dữ liệu

Trong nghiên cứu, tác giả đã sử dụng bộ dữ liệu là hoạt động của các tàu biển ra vào cảng Hải An được thu thập từ 01/02/2025 đến 08/02/2026 với 13 con tàu

và tổng số 336 lượt tàu ra vào cảng, Bảng 2 thể hiện cụ thể thông số kỹ thuật và số lượt ra vào của từng tàu được cập nhật hàng tuần trên cổng thông tin cảng Hải An.

3.2. Xử lý dữ liệu

a) Làm sạch dữ liệu

Mục tiêu của bước này là loại bỏ các điểm mâu thuẫn và các điểm dị thường có thể cản trở hoặc làm sai lệch quá trình huấn luyện mô hình. Kiểm tra giá trị khuyết thiếu & Kiểm tra giá trị rỗng: Sự xuất hiện của các giá trị khuyết thiếu hoặc rỗng (null/NaN) trong tập

dữ liệu có thể dẫn đến sự thiên lệch (bias) hoặc làm giảm độ chính xác trong quá trình huấn luyện mô hình, đặc biệt là khi các biến (features) quan trọng bị thiếu thông tin. Để giải quyết, tập dữ liệu cần được rà soát toàn diện. Các kỹ thuật xử lý thường bao gồm: loại bỏ hoàn toàn các bản ghi không đầy đủ nếu tỷ lệ thiếu thấp, hoặc sử dụng các kỹ thuật nội suy (imputation techniques) như điền giá trị trung bình/trung vị để tăng tính toàn vẹn và độ tin cậy của tập dữ liệu. Các bản ghi có tỷ lệ giá trị thiếu vượt quá 20% đối với các biến chính được loại bỏ khỏi bộ dữ liệu.

b) Mã hóa dữ liệu phân loại

Quá trình này tinh chỉnh dữ liệu thô thành các định dạng mà thuật toán Học máy có thể hiểu và xử lý tối ưu nhất.

Mã hóa One-hot: Các mô hình Học máy không thể trực tiếp xử lý dữ liệu dạng chữ hoặc phân loại. Kỹ thuật mã hóa One-hot được sử dụng để chuyển đổi các biến phân loại này thành dạng biểu diễn số học. Phương pháp này chia mỗi danh mục thành các cột nhị phân (chứa giá trị 0 hoặc 1), cho phép mô hình học hỏi hiệu quả từ các biến này mà không tự động gán cho chúng một thứ tự ưu tiên sai lệch (như khi dùng Label Encoding). Đặc biệt, One-hot encoding còn được chứng minh là giúp cải thiện khả năng diễn giải của các giá trị SHAP khi ứng dụng AI giải thích được (XAI).

c) Lựa chọn đặc trưng

Loại bỏ giá trị ngoại lai: Việc loại bỏ ngoại lai là cực kỳ quan trọng để tránh hiện tượng mô hình đưa ra các dự báo sai lệch do các giá trị cực đoan. Phương pháp phân tích điểm Z (Z-score analysis) được sử dụng để xác định mức độ sai lệch của một điểm dữ liệu so với giá trị trung bình. Công thức tính Z-score như sau:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Trong đó: x_i là một điểm dữ liệu cụ thể, μ là giá trị trung bình của tập dữ liệu, và σ là độ lệch chuẩn. Những điểm dữ liệu có giá trị Z-score vượt quá một ngưỡng nhất định sẽ được xem là giá trị ngoại lai và bị loại bỏ, đảm bảo rằng mô hình chỉ được huấn luyện trên nguồn dữ liệu sạch và mang tính đại diện cao.

Bên cạnh đó, các giá trị ngoại lệ được phát hiện và loại bỏ thông qua sự kết hợp giữa quy tắc chuyên môn và phương pháp thống kê Khoảng tứ phân vị (Interquartile Range - IQR). Cụ thể, các quan sát bị loại bỏ khi nằm ngoài khoảng sau: $[Q1 - 1,5 \times IQR, Q1 + 1,5 \times IQR]$. Tuy nhiên trong ngành hàng hải, việc áp dụng máy móc các tiêu chí thống kê có thể loại bỏ các

quan sát có ý nghĩa thực tiễn, đối với các tàu siêu trường, có thể là ngoại lai về mặt thống kê, nhưng phù hợp trong điều kiện vận hành thực tế. Do đó chỉ những giá trị nào được xét vào cả tiêu chí ngoại lai của IQR và vi phạm những ràng buộc kỹ thuật cơ bản của hệ thống tàu biển (như công suất, tốc độ âm, công suất vượt quá giới hạn cho phép).

Scaling numerical value: Các biến số học thường có đơn vị và độ lớn khác nhau. Để đảm bảo mọi đặc trưng đều đóng góp bình đẳng vào hiệu suất của mô hình và giúp thuật toán hội tụ nhanh hơn, dữ liệu cần được co giãn. Kỹ thuật Min-Max Scaling thường được sử dụng để chuyển đổi từng đặc trưng về một phạm vi chung (từ 0 đến 1). Công thức như sau:

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

Trong đó: $x_{\max}$ và $x_{\min}$ lần lượt là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của đặc trưng đó). Điều này đặc biệt quan trọng để giảm thiểu tác động tiêu cực của các biến có độ lớn áp đảo lên hàm mất mát.

3.3. Phương pháp kiểm kê phát thải

Nhằm nâng cao phương pháp tính toán lượng phát thải, nghiên cứu áp dụng việc kiểm kê kết hợp việc tuân thủ hướng dẫn của Bộ Tài Nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) về hướng dẫn kỹ thuật kiểm kê phát thải đối với các nguồn từ tàu thủy [28] và lấy cảm hứng từ mô hình kiểm kê được xây dựng cho cảng San Pedro Bay Ports [29], công thức tính toán như sau:

+ **Đối với động cơ MAN:**

$$E = LF \times EF_{\text{base}} \times P \times A \times EFA \times LAF_i \quad (3)$$

+ **Đối với động cơ không phải MAN:**

$$E = \begin{cases} LF \times EF_{\text{base}} \times P \times A & \text{nếu } LF \geq 20\% \\ (F \times EF_{\text{base}} \times P \times A \times EFA \times LLA) & \text{nếu } LF < 20\% \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:

E là lượng phát thải của tàu biển (g);

P là công suất máy (kW);

LF là hệ số tải của động cơ (%);

A là thời gian hoạt động của tàu (giờ);

EF_{base} là hệ số phát thải mặc định được cung cấp bởi EPA (g/kWh);

LAF_i là hệ số hiệu chỉnh tải (van trượt và van thường);

EFA là hệ số hiệu chỉnh phát thải theo từng loại nhiên liệu;

LLA là hệ số hiệu chỉnh tải thấp, không thứ nguyên.

Việc sử dụng bộ hệ số hiệu chỉnh tải theo tiêu

chuẩn theo hướng dẫn của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA) giúp công cụ nâng cao độ chính xác và được đánh giá cao hơn trong quá trình kiểm kê lượng phát thải cảng biển, đồng thời tuân thủ nghiêm ngặt hệ thống cơ sở dữ liệu đạt chuẩn quốc tế này giúp giảm thiểu các sai số tính và củng cố tính xác thực và độ tin cậy khoa học cho kết quả kiểm kê.

Bảng 3. Hệ số tải của động cơ phụ

Loại tàu	Hành trình	Điều động	Dỡ hàng
Tàu hàng rời	0,17	0,45	0,10
Tàu container	0,13	0,48	0,19
Tàu du lịch	0,80	0,80	0,64
Tàu hàng tổng hợp	0,17	0,45	0,22
Tàu khác	0,17	0,45	0,22
Tàu RORO	0,15	0,45	0,26
Tàu lạnh	0,20	0,67	0,32

+ Đối với máy chính thì [30]:

$$LF = (\text{Tốc độ thực tế} / \text{Tốc độ tối đa})^3 \quad (5)$$

+ Đối với các máy phụ tuân thủ hướng dẫn của [30]:

Trong các nghiên cứu trước đây nhằm đơn giản hóa việc kiểm kê phát thải, đa phần chỉ sử dụng hệ số phát thải cơ bản (EF base) [22] để tính toán, tuy vậy hệ số phát thải cơ bản không phản ánh đúng hoàn toàn

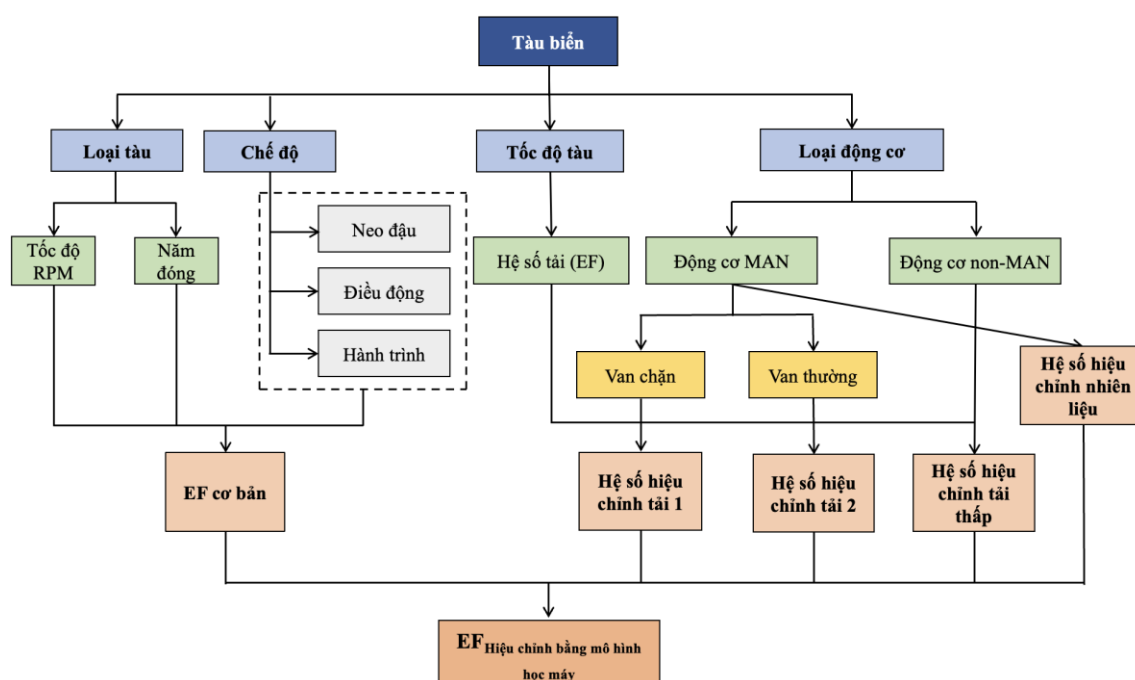
lượng phát thải của từng chất ở các điều kiện hoạt động khác nhau ở từng loại động cơ, do phải tính toán dựa vào bộ hệ số hiệu chỉnh tải được xây dựng bởi San Pedro Bay Ports [29]. Khi tàu chạy ở các mức tải khác nhau, mỗi loại động cơ đều có một xu hướng phát thải ở từng chất là khác nhau và hệ số hiệu chỉnh không tuân thủ bất kỳ quy tắc cố định nào mà tồn tại mối quan hệ phi tuyến tính tăng giảm khác nhau.

Từ đó, nghiên cứu nhận thấy cách tính thông thường sẽ tồn tại sai số nhất định, đồng thời đề nghị suy và hiệu chỉnh hệ số phát thải một cách thủ công sẽ mất nhiều thời gian. Nghiên cứu ứng dụng mô hình học LightGBM và XGBoost nổi bật với khả năng xử lý các bài toán hồi quy phi tuyến phức tạp, tốc độ xử lý nhanh và cho ra độ chính xác cao trong một số những nghiên cứu trước đây [31, 32], giúp tăng độ chính xác trong quá trình kiểm kê. Hình 2 thể hiện quy trình hiệu chỉnh hệ số phát thải tàu biển.

3.4. Mô hình LightGBM và XGBoost

Nhằm nâng cao độ chính xác trong kiểm kê khí thải, nghiên cứu ứng dụng 2 mô hình học máy gồm LightGBM và XGBoost. Hai mô hình có đặc điểm phù hợp với bộ dữ liệu dạng bảng, xử lý dữ liệu nhanh chóng với độ chính xác cao. Mô hình giúp xử lý được mối quan hệ phi tuyến của động cơ, tuổi tàu, hành trình và hệ số phát thải.

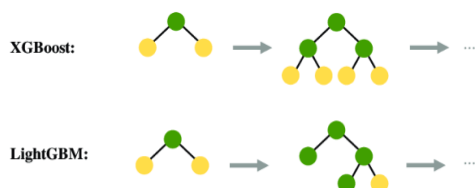
Các mô hình này có khả năng học từ dữ liệu với độ linh hoạt cao, đồng thời tối ưu hóa quá trình dự báo



Hình 2. Quy trình hiệu chỉnh hệ số phát thải tàu biển

thông qua cơ chế tăng cường (boosting) của các cây quyết định. Nhờ đó, mô hình có thể nhận diện các mẫu dữ liệu ẩn và các mối quan hệ phức tạp giữa các yếu tố như công suất động cơ, tuổi tàu, trạng thái vận hành (hành trình, điều động, neo đậu) và hệ số phát thải, từ đó cải thiện đáng kể độ chính xác của kết quả ước tính.

Cách tiếp cận này giúp nâng cao độ chính xác trong quá trình phân tích dữ liệu, nhưng đồng thời làm gia tăng đáng kể chi phí tính toán và yêu cầu bộ nhớ [33].



Hình 3. Mô tả mô hình LightGBM và XGBoost

3.4.1. Huấn luyện mô hình

Dữ liệu 336 lượt tàu được sử dụng làm dữ liệu nghiên cứu và được chia thành hai tập riêng biệt, bao gồm 80% cho quá trình huấn luyện và 20% cho quá trình kiểm tra. Việc tách dữ liệu như vậy giúp đánh giá chính xác khả năng tổng quát hóa của mô hình đối với những dữ liệu chưa được sử dụng trong quá trình học. Quá trình huấn luyện được thực hiện theo cơ chế gradient boosting, trong đó các cây quyết định được xây dựng tuần tự để điều chỉnh sai số còn tồn tại của các cây trước, nhờ đó mô hình từng bước cải thiện hiệu suất và tiến gần tới nghiệm tối ưu.

Ngoài ra, Để đánh giá khả năng tổng quát hóa của mô hình, bộ dữ liệu được chia một cách hệ thống thành năm tập con có kích thước tương đương, ký hiệu lần lượt là D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 .

Phương pháp xác thực chéo K-fold (K-fold cross-validation) với $K=5$ được áp dụng nhằm đảm bảo việc đánh giá mô hình mang tính khách quan và ổn định. Trong mỗi vòng lặp của quá trình xác thực, bốn tập con được sử dụng để huấn luyện mô hình (training set), trong khi tập còn lại được dùng làm tập kiểm định (validation set). Về mặt toán học, có thể biểu diễn như sau:

Tập huấn luyện (Training Set): D_i với $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$;

Tập xác thực (Validation Set): D_j với $j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, j \neq i$.

Quy trình này được lặp lại năm lần, sao cho mỗi tập con lần lượt đóng vai trò là tập xác thực đúng một lần, trong khi bốn tập còn lại được sử dụng cho quá

trình huấn luyện mô hình. Cụ thể, các vòng lặp được thực hiện như sau:

Vòng 1: Huấn luyện trên D_2, D_3, D_4, D_5 - Xác thực trên D_1 ;

Vòng 2: Huấn luyện trên D_1, D_3, D_4, D_5 - Xác thực trên D_2 ;

Vòng 3: Huấn luyện trên D_1, D_2, D_4, D_5 - Xác thực trên D_3 ;

Vòng 4: Huấn luyện trên D_1, D_2, D_3, D_5 - Xác thực trên D_4 ;

Vòng 5: Huấn luyện trên D_1, D_2, D_3, D_4 - Xác thực trên D_5 .

Sau khi hoàn tất năm vòng lặp, các chỉ số đánh giá hiệu suất của mô hình được tổng hợp bằng cách tính giá trị trung bình của kết quả trên toàn bộ các vòng xác thực. Cách tiếp cận này giúp cung cấp một ước lượng đáng tin cậy hơn về khả năng dự báo của mô hình trên dữ liệu chưa quan sát.

So với phương pháp chia dữ liệu đơn giản theo tỷ lệ train-test, kỹ thuật K-fold cross-validation giúp giảm thiểu sai lệch do cách chia dữ liệu ngẫu nhiên và đảm bảo rằng mọi quan sát trong bộ dữ liệu đều được sử dụng cho cả huấn luyện và kiểm định. Nhờ đó, phương pháp này mang lại đánh giá chính xác và ổn định hơn về năng lực tổng quát hóa của mô hình dự báo.

3.4.2. Đánh giá mô hình

Mô hình sử dụng các chỉ số đánh giá độ chính xác phổ biến bao gồm: R^2 , MAE và MAPE nhằm đánh giá độ chính xác của mô hình dự báo so với mô hình truyền thống. Công thức tính R^2 , MAE và MAPE được trình bày như sau:

$$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS} \quad (6)$$

Trong đó:

R^2 là độ lệch bình phương giải thích từ hồi quy,

ESS là tổng các độ lệch bình phương phần dư,

TSS là tổng các độ lệch bình phương toàn bộ.

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (7)$$

Trong đó:

$\hat{y}_i$: là hệ số phát thải EF dự đoán (g/kWh)

y_i : là hệ số phát thải cơ bản chuẩn theo EPA (g/kWh)

n : là số lượng tàu trong tập dữ liệu.

Việc sử dụng EF cơ bản theo tiêu chuẩn do EPA ban hành làm mốc tham chiếu cho phép đánh giá khách quan mức độ cải thiện của mô hình so với phương pháp ước tính truyền thống.

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |\varepsilon_t|}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t|}{n} \quad (8)$$

Trong đó:

Y_i là hệ số phát thải chuẩn theo EPA cơ bản của tàu i (g/kW),

$\hat{Y}_i$ là hệ số phát thải dự đoán bởi mô hình học máy của tàu thứ i (g/kW),

n là số lượng tàu trong tập dữ liệu.

Chỉ số MAE phản ánh mức độ sai lệch tuyệt đối trung bình của hệ số phát thải EF thông qua việc đo lường độ chênh lệch tuyệt đối giữa giá trị dự đoán và giá trị tham chiếu.

Bảng 4 trình bày kết quả đánh giá hiệu suất của hai mô hình học máy LightGBM và XGBoost trong ước tính phát thải các chất ô nhiễm. Các chỉ số được sử dụng bao gồm hệ số xác định (R^2), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số phần trăm trung bình tuyệt đối (MAPE), nhằm đánh giá toàn diện khả năng dự đoán của mô hình. Nhìn chung, cả hai mô hình đều đạt độ chính xác cao với giá trị R^2 dao động từ 0,9653 đến 0,9934. Điều này cho thấy các mô hình có khả năng giải thích tốt sự biến thiên của dữ liệu phát thải, vốn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố phi tuyến như chế độ vận hành động cơ, điều kiện tải và đặc điểm nhiên liệu. Đặc biệt, các chất như CO_2 và N_2O có giá trị R^2 xấp xỉ 0,99, phản ánh mối quan hệ tương đối ổn định giữa các biến đầu vào và lượng phát thải.

Tuy nhiên, sự khác biệt giữa hai mô hình thể hiện rõ khi xem xét chi tiết từng chỉ số. Mô hình XGBoost đạt giá trị R^2 cao hơn LightGBM đối với tất cả các loại chất ô nhiễm. Điều này cho thấy XGBoost có khả năng mô hình hóa tốt hơn các quá trình phát thải phức tạp, đặc biệt trong điều kiện vận hành biến động thường gặp trong hoạt động hàng hải.

Về sai số tuyệt đối (MAE), XGBoost cho thấy sự

cải thiện đáng kể so với LightGBM. Đối với CO_2 , MAE giảm từ 3385,172kg xuống còn 2160,946kg, tương ứng với mức giảm khoảng 36%. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận đối với các chất NO_x và CO , là những chất có mức phát thải lớn và biến động mạnh theo chế độ vận hành. Việc giảm sai số tuyệt đối ở các chất này có ý nghĩa quan trọng trong bối cảnh kiểm kê phát thải tại cảng biển, nơi tổng lượng phát thải tích lũy có thể rất lớn.

Sai số phần trăm trung bình tuyệt đối (MAPE) tiếp tục khẳng định ưu thế của XGBoost. Cụ thể, MAPE của LightGBM dao động từ 3,48% đến 6,61%, trong khi XGBoost chỉ nằm trong khoảng từ 2,22% đến 5,65%. Đáng chú ý, mức cải thiện rõ rệt nhất được quan sát ở các chất ô nhiễm như NO_x và CO , với mức giảm sai số lên tới gần 2%. Trong thực tiễn quản lý môi trường hàng hải, việc giảm sai số tương đối ở mức này có thể tạo ra sự khác biệt đáng kể trong đánh giá phát thải và xây dựng chính sách kiểm soát.

3.5. Kiểm kê phát thải tàu biển

Kết quả trích xuất từ nền tảng SPEI cho thấy toàn cảnh về hiện trạng phát thải Phạm vi 3 của tàu biển cập cảng Hải An trong chu kỳ 13 tháng (Bảng 5). Để tính toán CO_2 tương đương, chúng tôi đã sử dụng các giá trị tiềm năng nóng lên toàn cầu (Global Warming Potential - GWP) cho từng loại khí nhà kính, theo xác định của IPCC [34]: phát thải CO_2 , CH_4 , N_2O được nhân lần lượt với 1, 29,8 và 273. Kết quả kiểm kê cho thấy hoạt động tàu biển tại cảng Hải An phát sinh đồng thời khí nhà kính và các chất ô nhiễm không khí, trong đó nổi bật là CO_2 , NO_x , SO_x và vật chất dạng hạt ($PM_{2,5}$, PM_{10}). CO_2 chiếm tỷ trọng lớn nhất trong tổng lượng phát thải (13281486 kg), phản ánh mức tiêu thụ nhiên liệu cao và là tác nhân chính góp phần vào biến đổi khí hậu. Giá trị CO_2e cao hơn cho thấy đóng góp

Bảng 4. Đánh giá sai số mô hình

Loại chất	R^2 (LightGBM)	R^2 (XGBoost)	MAE (kg) (LightGBM)	MAE (kg) (XGBoost)	MAPE (%) (LightGBM)	MAPE (%) (XGBoost)
N_2O	0,9852	0,9910	0,1413	0,1061	3,48	2,22
SO_x	0,9835	0,9912	2,0328	1,6382	3,49	2,24
CO_2	0,9839	0,9912	3385,172	2160,946	3,52	2,29
$PM_{2.5}$	0,9754	0,9879	0,8338	0,6683	4,13	2,83
PM_{10}	0,9753	0,9880	0,9301	0,6988	4,15	2,80
CH_4	0,9771	0,9883	0,0423	0,033	4,58	3,13
HC	0,9771	0,9884	2,125	1,5623	4,58	3,11
NO_x	0,9884	0,9934	77,9345	64,3603	5,48	3,72
CO	0,9653	0,9703	6,3392	4,6191	6,61	5,65

Bảng 5. Kiểm kê lượng khí thải từ tàu biển tại cảng Hải An

Tháng	Chất khí thải ô nhiễm									
	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x	CO	HC	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO _{2e}
02/2026	55,12	49,30	2313,6	125,3	327,9	135,0	217138	8,89	2,64	219644
01/2026	184,3	165,7	9150,2	424,9	1089,3	469,1	716386	30,04	9,08	724858
12/2025	283,8	254,7	14150	656,1	1667,1	723,2	1110013	46,23	13,95	1123050
11/2025	223,4	200,4	11297	514,0	1312,3	568,6	870286	36,09	10,97	880465
10/2025	192,6	173,1	10132	440,7	1125,4	488,4	745287	30,98	9,48	754027
09/2025	265,7	238,5	14039	608,3	1552,4	672,4	1024528	42,91	13,03	1036631
08/2025	340,2	305,3	17566	779,9	1988,4	862,0	1319414	54,80	16,63	1334870
07/2025	329,8	296,9	16908	752,8	1933,9	830,6	1274480	53,08	16,16	1289451
06/2025	324,1	291,3	17475	741,2	1895,9	822,2	1250275	52,23	15,91	1265008
05/2025	329,4	295,4	17028	751,1	1918,6	827,9	1269257	52,83	16,02	1284157
04/2025	348,8	313,4	17996	796,6	2041,4	866,9	1340444	56,06	16,89	1356252
03/2025	297,6	267,4	15755	680,0	1738,3	749,3	1136651	48,17	14,59	1150236
02/2025	260,8	234,2	12438	597,5	1522,9	645,3	1007327	41,79	12,49	1019108
Tổng	3435,6	3085,6	176247	7868	20113	8660,9	13281486	554,1	167,84	13437757

(Đơn vị: Kg)

bổ sung của CH₄ và N₂O, dù khối lượng nhỏ nhưng có tiềm năng gây nóng lên toàn cầu lớn.

Trong nhóm khí ô nhiễm, NO_x (176247kg) là chất nguy hiểm nhất do khả năng hình thành ozone tầng thấp và gây mưa axit, ảnh hưởng trực tiếp đến môi trường không khí khu vực cảng. SO_x (7868kg) cũng là tác nhân gây ăn mòn và suy giảm hệ sinh thái ven biển, trong khi CO (20113kg) và HC phản ánh quá trình cháy không hoàn toàn, gây ô nhiễm không khí cục bộ. Đặc biệt, mặc dù có khối lượng nhỏ hơn so với các chất khác, PM_{2,5} và PM₁₀ là nhóm chất đặc biệt nguy hiểm đối với sức khỏe con người, do khả năng xâm nhập sâu vào hệ hô hấp, làm gia tăng nguy cơ các bệnh tim mạch và hô hấp trong khu vực lân cận cảng.

Nhìn chung, phát thải tại cảng Hải An không chỉ có quy mô lớn mà còn bao gồm nhiều chất ô nhiễm nguy hiểm, đòi hỏi biện pháp kiểm soát đồng bộ nhằm giảm thiểu tác động đến môi trường và sức khỏe cộng đồng, hướng tới phát triển cảng biển bền vững.

4. SPEI - Ship Port Emission Inventory

Nghiên cứu một số quốc gia cho thấy việc xây dựng một công cụ quản lý lượng phát thải là cần thiết trong chiến dịch quản lý và đưa ra các chính sách giảm thiểu phát thải. Mỹ đã nghiên cứu và xây dựng MOVES [35], Hàn Quốc vận hành hệ thống K-ETS [36], Vương Quốc Anh tích hợp bộ hệ số UK GHG Conversion Factors [37], Australia sử dụng National Greenhouse Accounts Calculator để ước tính phát thải trên nhiều lĩnh vực kinh tế [38].

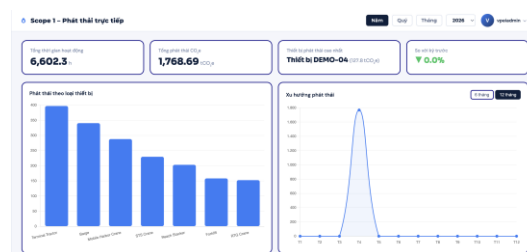
Công cụ kiểm kê quy mô quốc gia với độ phân giải

cao là chiến lược giúp nhà nước quản lý, đưa ra chính sách giảm phát thải tối ưu qua kinh nghiệm của nhiều nước trên thế giới. Do đó, trong nghiên cứu này tác giả xây dựng một công cụ nhằm kiểm kê lượng phát thải tàu biển tại Việt Nam, từ đó giúp các nhà hoạch định chính sách, khai thác tại cảng biển, vận hành và đưa các biện pháp hiệu quả giúp giảm thiểu lượng phát thải tại cảng biển.

4.1. Mô tả công cụ kiểm kê phát thải SPEI

4.1.1. Phạm vi phát thải 1 (Scope 1)

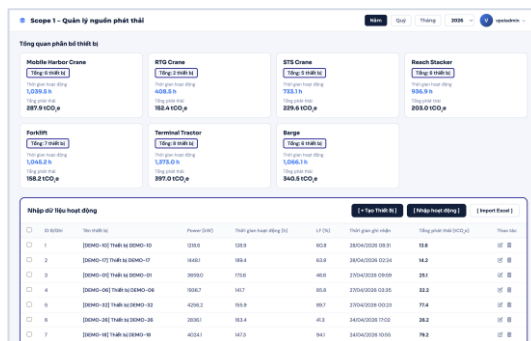
Với Scope 1, mục tiêu quản lý những thiết bị thuộc quyền sở hữu của cảng biển, sử dụng nhiên liệu hóa thạch, công cụ giúp quản lý mức phát thải của từng trang thiết bị, công cụ giúp đánh giá theo thời gian thực, so sánh và tạo biểu đồ trực quan giúp quản lý một cách hiệu quả.



Hình 4. Dashboard phạm vi phát thải 1

SPEI cho phép sửa đổi, thêm, xóa các thiết bị một cách dễ dàng, đồng thời công cụ còn giúp quản lý lượng thiết bị tại cảng sử dụng nhiên liệu Diesel, hệ số phát thải và hệ số tải được tuân thủ theo hướng dẫn

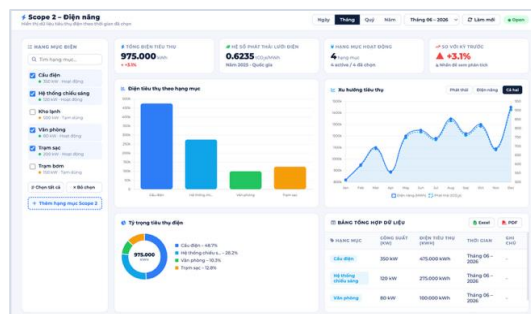
của US EPA và cảng San Pedro Bay Ports [29] được cập nhật hàng năm.



Hình 5. Quản lý thiết bị phạm vi phát thải 1

4.1.2. Phạm vi phát thải 2 (Scope 2)

Scope 2 là lượng phát thải gián tiếp tại cảng phát sinh do lượng tiêu thụ nhiên liệu điện. SPEI phân loại và tính toán lượng phát thải từng nguồn theo hướng dẫn của lưới điện Việt Nam qua các năm, theo nghiên cứu năm 2026, hệ số phát thải của lưới điện Việt Nam 2025 là 0,6235 tCO₂e/MWh [39].



Hình 6. Dashboard phạm vi phát thải 2

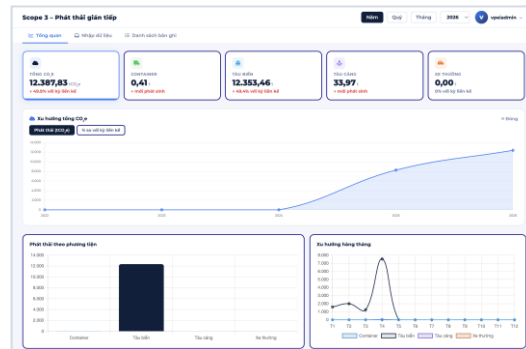
4.1.3. Phạm vi phát thải 3 (Scope 3)

Đóng góp cốt lõi của nghiên cứu nằm ở việc giải quyết bài toán phát thải Scope 3, thành tố chiếm tỷ trọng áp đảo nhưng phức tạp nhất trong bức tranh môi trường cảng biển. Trong Scope 3, SPEI ứng dụng thuật toán AI vào kiểm kê giúp đánh chính xác các tác động của từng yếu tố đầu vào, từ đó xây dựng chiến lược giảm thiểu nguồn phát thải trọng điểm này. Nền tảng SPEI đáp ứng nhu cầu kiểm kê khí thải một cách minh bạch với khả năng đánh giá theo không gian và thời gian. Đây là một yêu cầu mang tính quyết định, định hướng cho các nhà hoạch định chính sách và doanh nghiệp cảng trong việc tái thiết kế chuỗi cung ứng, hiện thực hóa các giải pháp khử carbon toàn diện.

4.1.4. Xuất báo cáo kiểm kê phát thải

Tính năng xuất báo cáo cho phép cảng biển, đội

tàu, đánh giá lượng phát thải. SPEI không chỉ cung cấp khả năng trực quan hóa và bóc tách dữ liệu vì mô đến từng nguồn xả thải đặc thù mà còn tích hợp chức năng phân tích đối chiếu chuỗi thời gian nhằm đánh giá biến động và hiệu lực của các biện pháp can thiệp môi trường.



Hình 7. Dashboard phạm vi phát thải 3



Hình 8. Báo cáo kiểm kê phát thải

5. Kiến nghị

Thứ nhất, để thực hiện mục tiêu phát triển kinh tế biển bền vững và Net Zero của Việt Nam tầm nhìn 2050, thì việc áp dụng một công cụ kiểm kê phát thải với quy mô quốc gia là điều cần thiết. Công cụ là cơ sở để đánh giá lượng phát thải tại cảng, khu vực, quốc gia một cách chính xác và bao quát nhất. Từ đó xây dựng một hệ thống chiến lược toàn diện từ giảm thải, chuyển đổi năng lượng, đầu tư hạ tầng xanh như điện bờ, chính sách phát triển cơ sở hạ tầng các cơ sở lưu trữ phân phối nhiên liệu mới thân thiện với môi trường như LNG, H₂, Methanol,... giúp đạt mục tiêu trung hòa carbon.

Thứ hai, việc ứng dụng công cụ cần được thực hiện từng bước, xây dựng chính sách, nghị quyết về kiểm định quản lý cấp quốc gia, từng bước áp dụng tại các cảng biển thực hiện công cụ kiểm kê dưới sự quản lý và giám sát của nhà nước và các cơ quan nhà nước có thẩm quyền, nhằm xây dựng một hệ thống thống nhất, minh bạch, đánh giá kịp thời các nguyên nhân

tiềm tàng gây ra lượng phát thải, các điểm nghẽn phát thải khu vực, tập trung nguồn lực, nhân lực, tài lực tránh đầu tư dàn trải lãng phí ngân sách nhà nước.

Thứ ba, dựa vào công cụ kiểm kê xây dựng hệ thống đánh giá các cụm cảng, bến cảng với độ phân giải cao ở quy mô quốc gia, nghiên cứu và triển khai các chỉ số phát thải và chỉ số chuyển đổi xanh dựa vào hành động của cảng như chuyển đổi nhiên liệu, điện bờ,... Xây dựng giới hạn tối thiểu yêu cầu chuyển đổi thiết bị, mức độ thân thiện với môi trường với các mục tiêu định kỳ 5 năm và được kiểm tra tiến độ thực hiện hàng năm. Dựa vào các yếu tố như quy mô, năng suất khai thác, tình hình phát thải hiện tại là cơ sở xây dựng một chính sách và các khung pháp lý phù hợp cho từng nhóm cảng biển, tránh tạo áp lực lớn cho doanh nghiệp tuy nhiên vẫn cần sự quyết liệt hơn giảm thiểu lượng khí nhà kính. Tác giả đề xuất trước hết cần đưa ra các chính sách ưu đãi cho cảng biển và đội tàu thông qua chỉ số chuyển đổi xanh và chỉ số tăng trưởng chuyển đổi xanh qua hàng năm. Xây dựng các chế tài xử lý các doanh nghiệp không tuân thủ và áp dụng các chính sách giảm thải được ban hành.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã là cơ sở để giải quyết bài toán cấp thiết về quản lý và định lượng khí nhà kính tại các khu vực cảng biển Việt Nam thông qua việc phát triển công cụ kiểm kê phát thải SPEI. Khác biệt với các cách tiếp cận từ trên xuống truyền thống vốn tồn tại nhiều giới hạn về dữ liệu, nghiên cứu đã tiên phong ứng dụng phương pháp từ dưới lên kết hợp cùng thuật toán học máy hiện đại, tạo ra một bước tiến mới trong việc nâng cao độ phân giải và tính chính xác của công tác kiểm kê.

Nghiên cứu cho thấy XGBoost mang lại hiệu suất dự báo vượt trội so với các phương pháp thông thường. Mô hình đã xử lý hiệu quả các mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa đặc tính kỹ thuật tàu và trạng thái vận hành, đạt độ chính xác ấn tượng với hệ số xác định R^2 ở tất cả các chất đều lên tới 0,97 và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) với chất lớn nhất chỉ ở mức 5,65% thông qua ứng dụng thí điểm cho tàu biển tại cảng Hải An.

Từ góc độ vĩ mô, công cụ SPEI được xem là nền tảng dữ liệu khoa học mang tính quyết định, hỗ trợ đắc lực cho các cơ quan quản lý nhà nước và doanh nghiệp hàng hải trong việc hoạch định chính sách.

Nghiên cứu không chỉ đóng góp một giải pháp công nghệ mang tính thực tiễn cao cho ngành logistics hàng hải, mà còn đặt nền móng cho việc xây dựng một hệ thống giám sát phát thải cảng biển cấp quốc gia. Đây là

tiền đề giúp ngành hàng hải Việt Nam đẩy nhanh lộ trình chuyển đổi xanh, hiện thực hóa cam kết phát thải ròng bằng “0” (Net Zero) vào năm 2050 và hướng tới mục tiêu phát triển kinh tế biển bền vững. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả hướng tới việc tích hợp dữ liệu AIS theo thời gian thực đồng thời phát triển một hệ thống hỗ trợ ra quyết định di chuyển tối ưu nhằm giảm thiểu khí thải ô nhiễm tại cảng biển lấy cảm hứng từ hệ thống vận tải biển thông minh, điều hướng dựa trên trí tuệ nhân tạo của tàu tự hành.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sirimanne, et al. (2019), *Review of Maritime Transport 2019*, London, UK: International Maritime Organization.
- [2] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2023), *Review of Maritime Transport 2023*.
- [3] International Maritime Organization (IMO) (2020), *Fourth Greenhouse Gas Study 2020*.
- [4] Shi, J. et al. (2025), *The impact of low-sulfur marine fuel policy on air pollution in global coastal cities*, Sustainable Horizons, Vol.14, p.100130.
Doi: 10.1016/j.sh.2025.100130.
- [5] Ducruet, C. et al. (2024), *Ports and their influence on local air pollution and public health: A global analysis*, Science of the Total Environment, Vol.915, p.170099.
Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170099.
- [6] Thủ tướng Chính phủ (2021), *Quyết định số 1579/QĐ-TTg ngày 22-09-2021 Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng biển Việt Nam thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*.
- [7] European Environment Agency (2023), *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 (EEA Report No 06/2023)*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [8] Eyring, V. et al. (2005), *Emissions from international shipping: 1. The last 50 years*, J. Geophys. Res. Atmos., Vol.110.
- [9] Psaraftis, H. N. & Kontovas, A. C. (2009), *CO₂ emission statistics for the world commercial fleet*, WMU J. Marit. Aff., Vol.8, pp.1-25.

- [10] Olivier, J. G. et al. (2005), *Recent trends in global greenhouse gas emissions: Regional trends 1970-2000 and spatial distribution of key sources in 2000*, Environ. Sci., Vol.2, pp.81-99.
- [11] Kesgin, U. & Vardar, N. (2001), *A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits*, Atmos. Environ., Vol.35, pp.1863-1870.
- [12] European Environment Agency (2019), *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 (Report No. 13/2019)*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [13] U.S. Environmental Protection Agency (1999), *Control of Emissions of Air Pollution from New Marine Compression Ignition Engines at or above 37 kW*, Ann Arbor, MI, USA: Office of Transportation Air Quality.
- [14] Song, S. (2014), *Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port*, Atmos. Environ., Vol.82, pp.288-297.
- [15] Nunes, R. A. O. et al. (2017), *The activity-based methodology to assess ship emissions-A review*, Environ. Pollut., Vol.231, pp.87-103.
- [16] Son, L. A., Zhang, J. & Fujiwara, A. (2012), *The MATLAB Toolbox for GPS Data to Calculate Motorcycle Emission in Hanoi - Vietnam*, International Conference on Environment, Energy and Biotechnology, Vol.33, pp.1-6.
- [17] Hào Quang Bằng và cộng sự (2013), *Tính toán phát thải các chất ô nhiễm không khí và mô hình hoá chất lượng không khí cảng Sài Gòn, Việt Nam*, Science & Technology Development, Số 16(M1).
- [18] Vũ Hoàng Ngọc Khuê và cộng sự (2018), *Tính toán phát thải khí thải và ứng dụng hệ mô hình TAPM-AERMOD mô phỏng ô nhiễm không khí từ hệ thống bến cảng tại Thành phố Hồ Chí Minh*, Tạp chí phát triển Khoa học & Công nghệ: Chuyên san Khoa học Trái đất & Môi trường, Tập 2(2).
- [19] Đỗ Phong Lưu (2020), *Sử dụng dữ liệu nhận dạng tự động (AIS) ước tính lượng khí phát thải của tàu thuyền hoạt động tại Thành Phố Hồ Chí Minh*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, Số 21.
- [20] Huỳnh Tất Minh & Phan Minh Tiến (2022), *Nghiên cứu thuật toán xác định lượng khí thải CO₂ và năng lượng tiêu hao dựa trên mô hình xây dựng cảng container*, Tạp chí Khoa học Công nghệ, Số 08/2022
- [21] Trần Thị Hồng Hiền và cộng sự (2023), *Nghiên cứu phát thải từ hoạt động của xe mô tô, xe gắn máy trong giao thông đường bộ tại Thành phố Hà Nội*, Tạp chí Môi trường, Số 10/2022
- [22] Ngô Như Tãi và cộng sự (2025), *Nghiên cứu hiệu quả hoạt động luân chuyển hàng hóa và lượng khí thải của tàu biển ở cảng MPC Hải Phòng*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 82(82), tr.151-157
- [23] Phạm Thanh Tuấn và cộng sự (2025), *Emission assessment in operation period when replacing Cat Lai Ferry with river crossing bridge*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Giao thông, Tập 5(3), tr.83-90
- [24] Al Nuaimi, H. S. et al. (2025), *Machine learning applications for carbon emission estimation*, Resources, Conservation & Recycling Advances, Vol.27, p.200263
- [25] Xiao, G. et al. (2024), *The Application of Artificial Intelligence Technology in Shipping: A Bibliometric Review*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12, p.624.
- [26] Farzadmehr, et al. (2025), *AI-powered solutions assessment in port and maritime sector*, Doctoral dissertation, University of Antwerp.
- [27] Nguyen, P. N. (2025), *Ship emissions and social costs at Southeast Asian container ports*, Transport and Sustainable Energy.
- [28] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2024), *Công văn số 1074/BTNMT-KSONMT ngày 21/02/2024 về hướng dẫn kỹ thuật kiểm kê phát thải bụi và khí thải từ nguồn thải điểm, nguồn diện và nguồn di động*.
- [29] Starcrest Consulting Group, LLC. (2024), *San Pedro Bay Ports emissions inventory methodology report (Version 5)*, Prepared for the Port of Los Angeles and the Port of Long Beach.
- [30] U.S. Environmental Protection Agency (2009), *Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories Final Report*, Virginia.
- [31] Ullah, I. et al. (2021), *A comparative performance of machine learning algorithm to predict electric vehicles energy consumption: A path towards sustainability*, Energy & Environment.

- [32] Cinarer, et al. (2024), *Application of various machine learning algorithms in view of predicting the CO₂ emissions in the transportation sector*, Sustainable Transportation and Energy Transition.
- [33] Ke, G. et al. (2017), *LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree*, Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), Vol.30, pp.3146-3154.
- [34] Greenhouse Gas Protocol (2024), *IPCC Global Warming Potential Values (Version 2.0)*, World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.
- [35] United States Environmental Protection Agency (2023), *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) User Guide*, Washington, DC.
- [36] Korea Environment Corporation (2021), *Korea Emissions Trading Scheme (K-ETS): Phase III Allocation Plan*, Ministry of Environment, South Korea.
- [37] UK Department for Environment, Food & Rural Affairs (2023), *UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting*.
- [38] Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2022), *National Greenhouse Accounts (NGA) Calculator*.
- [39] Lê Hải Hưng và cộng sự (2026), *Ước tính hệ số phát thải khí nhà kính của lưới điện Việt Nam 2025*, Tạp chí Điện tử của Bộ Nông Nghiệp và Môi trường.

Ngày nhận bài:	23/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	25/04/2026
Ngày duyệt đăng:	04/05/2026